
LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ATMOSPHÄRENPHYSIK e. V.

an der Universität Rostock

Ostseebad Kühlungsborn

Abschlussbericht zum Vorhaben

ECOMA - Existence and Charge State of Meteoric
Dust Particles in the Middle Atmosphere - Teil 2

FKZ 50 OE 0801

Prof. Dr. Markus Rapp

1. September 2011

Inhaltsverzeichnis

1 Gesamtziel des Vorhabens und Aufgabenstellung	3
1.1 Zusammenfassung	3
1.2 Wissenschaftliches Umfeld zum Zeitpunkt des Projektbeginnes	3
1.3 Wissenschaftliche Ziele	5
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Wissenschaftliche Ergebnisse	7
2.1 Der ECOMA-Partikeldetektor	7
2.2 Ergebnisse zur Ladungsbilanz während ECOMA-2010	8
2.3 Ergebnisse zur MSP-Zusammensetzung während ECOMA-2010	12
3 Referenzen	18
4 Liste der Veröffentlichungen im Rahmen des ECOMA-Projektes	20

1 Gesamtziel des Vorhabens und Aufgabenstellung

1.1 Zusammenfassung

Durch koordinierte Messungen mit Hilfe von Höhenforschungsraketen und bodengebundenen Instrumenten (Radars und Lidars) wurde der Einfluss eines starken Meteorschauers (nämlich der Geminiden) auf die Eigenschaften von Meteorstaubpartikeln in der mittleren Atmosphäre untersucht. Dazu wurde im Dezember 2010 eine Messkampagne in Nordnorwegen durchgeführt, in deren Verlauf drei Raketenstarts durchgeführt wurden, wobei ein Start vor Beginn des Schauers, einer am Maximum der Schaueraktivität und der letzte Start nach Abklingen der Schaueraktivität stattfand.

Als wesentliche Ergebnisse der Messkampagne konnte festgestellt werden, dass Variationen der Ladungsdichte der Meteorstaubpartikel nicht mit der Schaueraktivität korrelieren. Zusätzlich wurden erstmalig allerdings auch Photoelektronenspektren der Staubpartikel aufgenommen, die darauf hinweisen, dass sich die Zusammensetzung der Staubpartikel vor und nach der Schaueraktivität stark unterscheidet. Das herausragende Ergebnis dieser Messkampagne ist dabei, dass am Maximum der Schaueraktivität das beobachtete Messsignal so unterschiedlich von den Ergebnissen vorher und nachher ist, dass vermutet werden muss, dass der Eintrag von Meteor material der Geminiden zu einer sehr starken Änderungen der Staubpartikelzusammensetzung führt, die bisher nicht in Erwägung gezogen wurde. Damit haben die hier erzielten Ergebnisse weitreichende Konsequenzen für unser Verständnis der relevanten physikalischen und chemischen Prozesse und werfen neue Fragen auf, die in zukünftigen Projekten angegangen werden sollten.

Das Projekt wurde im Rahmen eines deutsch-norwegischen Gemeinschaftsprojektes durchgeführt, in dem alle Kosten, außer für die Bereitstellung der jeweiligen Instrumente, von beiden Partnern je zur Hälfte getragen wurden.

1.2 Wissenschaftliches Umfeld zum Zeitpunkt des Projektbeginnes

Mehr als einhundert Jahre nach der Entdeckung der leuchtenden Nachtwolken (NLC, engl.: noctilucent cloud) durch den deutschen Astronomen Otto Jesse [1] wird die Bedeutung dieser höchsten Wolken in der Erdatmosphäre für den Nachweis anthropogener Klimaänderungen immer deutlicher [2]. Nach heutigem Verständnis bilden sich leuchtende Nachtwolken unter den extremen thermischen Bedingungen des polaren Sommers in der Mesopausenregion, wo in 88 km Höhe Temperaturen von weniger als 130 K auftreten [3]. Bei solch niedrigen Temperaturen kann der nur in geringen Konzentrationen vorliegende Wasserdampf [4] zu Eiskristallen kondensieren. Diese Eisteilchen wachsen zu einer Größe von einigen zehn Nanometern und sind dann vom Boden aus mit dem bloßen Auge oder mit Lidars zu beobachten [5; 6]. Nun haben Wissenschaftler nachgewiesen, daß es in den letzten 40 Jahren einen stetigen Anstieg der Häufigkeit von leuchtenden Nachtwolken gibt [7; 8]. Dieser Anstieg könnte zum einen durch einen negativen Temperaturtrend oder aber durch einen Anstieg des mesosphärischen Wasserdampfes verursacht werden. Beide Prozesse sind dabei möglicherweise anthropogen bedingt: die zunehmende Emission von Kohlendioxid führt in der Troposphäre zu einem Anstieg der Temperatur (der sogenannte Treibhauseffekt), in der Mesopausenregion jedoch zu einem Energieverlust durch Abstrahlung, der u. U. zu einer Abkühlung führt [9; 10]. Ob eine Abkühlung wirklich vorliegt, ist fraglich: So hat zum Beispiel [11] gezeigt, daß die Temperaturen in der polaren Sommermesosphäre über die letzten 40 Jahre im Rahmen der Meßgenauigkeit konstant geblieben sind. Allerdings könnte die Konzentration von Wasserdampf durch die vermehrte anthropogene Emission von Methan, das in der Stratosphäre zu Wasserdampf oxidiert wird, angestiegen sein [12]. Messungen hierzu sind allerdings nicht vorhanden.

Um die Ursache für den Anstieg der NLC-Häufigkeit und den Zusammenhang zu den atmosphärenphysikalischen Hintergrundparametern bestimmen zu können, müssen die grundlegenden mikrophysikalischen Prozesse, die zu der Bildung der mesosphärischen Eiskristalle führen, verstanden sein. Dies ist bis heute nicht der Fall. Bei der Erzeugung der Eisteilchen spielt die Nukleation

der Teilchen eine besondere Rolle. Unter der Nukleation der Eisteilchen versteht man den Übergang eines gesättigten Wasserdampfes in die feste Phase. Während homogene Nukleation aufgrund der geringen Wasserdampfkonzentration in der Mesopausenregion nahezu auszuschließen ist [13], wurde sowohl die Nukleation auf positiven Wassercluster-Ionen [14; 15] als auch die Nukleation auf kleinsten Staubteilchen meteorischen Ursprungs vorgeschlagen [16; 17]. Modellrechnungen von Turco und Koautoren [17] haben gezeigt, daß die Beobachtungen eher mit der Annahme einer Nukleation auf Staubteilchen in Einklang zu bringen sind.

Staubteilchen meteorischen Ursprungs spielen also für unser Verständnis der Eisteilchenbildung in der polaren Mesopausenregion eine alles entscheidende Rolle. Demgegenüber ist auffällig, daß bis zum Beginn des ECOMA-Projektes keine einzige eindeutige Messung ihrer Häufigkeit, Höhenverteilung, sowie weiterer Eigenschaften wie ihrer Ladung existierte.

Nach Hunten und Koautoren [16] bilden sich die Staubteilchen durch Rekondensation von meteoridischen Material, das beim Eintritt in die Erdatmosphäre verdampft ist. Aus den Rekondensationsprodukten mit einem Radius von ca. 0.5-1.5 nm [18] bildet sich durch Koagulationsprozesse eine Größenverteilung von Staubteilchen mit typischen Radien von etwa 1-5 nm. Nach diesen Modellrechnungen erwartet man Anzahldichten von einigen tausend Teilchen pro cm^3 in 80-90 km Höhe. Bei diesen Radien spielt der Kelvin-Effekt beim Eiskristallwachstum keine Rolle mehr, so daß sich in einer übersättigten Gasphase Eiskristalle auf dem Staubteilchen bilden können. Die Annahme heterogener Nukleation von NLC Partikeln auf Meteorstaubteilchen hat sich seit der Arbeit von [16] bei der Modellierung von NLC-Teilchen etabliert [19; 20; 21; 22; 23].

Die Staubteilchen sind für übliche massenspektrometrische Methoden zu groß und für andere Verfahren (z. B. optische Methoden) zu klein. Es ist daher nicht verwunderlich, daß ein zweifelsfreier experimenteller Nachweis der Existenz dieser Teilchen viele Jahre lang als unmöglich angesehen wurde. Bis zum Beginn des ECOMA-Projektes gab es nur indirekte Hinweise aus Massenspektrometer-Messungen von [24], die große negative Clusterionen mit Massen größer als 400 amu nachgewiesen haben. Außerdem haben [25] in der tropischen Mesosphäre eine 5 km breite Schicht von positiv geladenen Staubteilchen mit einer Anzahldichte von ca. 10 cm^{-3} gemessen. Allerdings sind die experimentellen Ergebnisse aufgrund der verwendeten Messtechnik nicht eindeutig zu interpretieren.

Neben den leuchtenden Nachtwolken gibt es in der Mesopausenregion ein zweites Phänomen, das eng mit der Existenz kleinster Eisteilchen verknüpft ist, nämlich die „Polaren Mesosphären Sommer Echos“ (PMSE), die zum Ende der 70er Jahre mit VHF-Radars entdeckt wurden [26; 27]. Hier handelt es sich um starke Radarechos aus der polaren Sommermesopausenregion, die nach heutiger Theorie maßgeblich durch die Anwesenheit geladener ca. 10 nm großer Eisteilchen und deren Wirkung auf das Elektronengas erklärt werden können [28; 29]. Allerdings fordert die Theorie die Existenz mehrere tausend solcher kleinen geladenen Eisteilchen pro cm^3 , im Gegensatz zu den $\sim 10/\text{cm}^3$, wie sie z. B. von [25] beobachtet wurden. Andererseits ist auch der Ladungszustand der Staubteilchen selbst unklar. Modellrechnungen gehen zwar davon aus, daß sich Teilchen mit einem Radius von $\sim 1 \text{ nm}$ einfach negativ aufladen [30], allerdings ist bei diesen kleinen Radien die Anwendbarkeit der Theorie fragwürdig.

1.3 Wissenschaftliche Ziele

Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, ist die genaue Kenntnis über Existenz, Konzentration und Ladungszustand der Meteorstaubteilchen unbedingte Voraussetzung für ein vollständiges Verständnis der Eisteilchenbildung in der polaren Sommermesopausenregion. Darüberhinaus lassen sich durch die Bestimmung der oben genannten Parameter wesentliche Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse beim Eindringen von Meteor material in die terrestrische Atmosphäre gewinnen.

Das ECOMA-Projekt sollte daher die folgenden wissenschaftliche Ziele verfolgen:

1. Bestimmung der Häufigkeit und Höhenverteilung von Meteorstaubteilchen in der Mesopausenregion
2. Bestimmung des Ladungszustandes der Meteorstaubteilchen und Identifikation des Aufladungsmechanismus
3. Untersuchung der Rolle von Meteorstaubteilchen bei der Nukleation mesosphärischer Eispartikel
4. Bestimmung der Änderung der Meteorstaubkonzentration und Höhenverteilung als Folge erhöhten Einfalls von Meteor material

Im Rahmen des Projektteiles 1 wurden die Punkte 1-3 erfolgreich bearbeitet und die Ergebnisse wurden im entsprechenden Abschlussbericht im Detail dargestellt. Punkt 4 wurde im Projektteil 2 bearbeitet. Die entsprechenden Ergebnisse sind Gegenstand dieses Berichtes.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen dieses zweiten Projektteiles wurden insgesamt drei instrumentierte Höhenforschungsraketen gestartet. Wie die Kampagnen zuvor fand auch die vierte und letzte Kampagne des ECOMA-Projektes auf der nordnorwegischen Insel Andøya (69°N, 16°E) statt, wobei von den bodengebundenen Messinstrumenten des ebenfalls dort gelegenen ALOMAR-Observatoriums sowie von den nur ~130 km entfernten EISCAT-Radars in Tromsø intensiv Gebrauch gemacht wurde.

Die vierte und letzte Kampagne widmete sich dem Einfluss des Geminiden-Meteorschauers auf die Eigenschaften von Meteorstaubpartikeln. Dazu wurden insgesamt drei Höhenforschungsraketen gestartet, wobei eine vor dem Schauer, eine zum Zeitpunkt maximaler Schaueraktivität und eine nach dem Schauer gestartet wurde. Die Startfolge während der ECOMA-2010-Kampagne ist im Folgenden dargestellt.

Tab. 1: Datum, Zeit, und Startbedingungen der ECOMA-Flüge 2010

Label	Datum	Zeit [UT]	Startbedingung
ECOMA07	04 Dez. 2010	04:21	vor Geminiden, ruhige D-Schicht
ECOMA08	13 Dez. 2010	03:24	Max. der Geminiden, leicht gestörte D-Schicht
ECOMA09	19 Dez. 2010	02:36	nach Geminiden, leicht gestörte D-Schicht

Zusätzlich gibt untenstehende Tabelle Aufschluß über die jeweils eingesetzte Instrumentierung. Details zu den einzelnen Instrumenten befinden sich entweder unten im Text (zum ECOMA-Partikeldetektor als Hauptinstrument) oder in den im Anhang aufgeführten Veröffentlichungen.

Tab. 2: Instrumente auf den einzelnen Höhenforschungsraketen; Markierung mit „X“ bedeutet, dass das Instrument auf dem jeweiligen Flug eingesetzt wurde. Gastinstrumente wurden bereitgestellt von der TU Graz, dem Meteorologischen Institut Stockholm (MISU) und der Universität Oslo (U Oslo) in Norwegen.

Instrument	Institution	ECOMA07	08	09
Hauptinstrumentierung				
ECOMA-Partikeldetektor neu (3 Xe-Lampen)	IAP	X	-	X
ECOMA-Partikeldetektor (1 Xe-Lampe)	IAP	-	X	-
CONE-Ionisationsmanometer	IAP	X	X	X
Pirani-Dichtesensoren (2)	IAP	X	X	X
Elektronenprobe	FFI	X	X	X
Ionenprobe	FFI	X	X	X
Gäste				
Multi-Needle Langmuirsonde	U Oslo	X	X	X
Radiowellenausbreitung	TU Graz	X	X	X
NO und O-Photometer	MISU	X	X	X

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen wurden unterstützt durch eine Reihe von bodengebundenen Experimenten. Hervorzuheben sind die auf ALOMAR installierten Lidars, Radars und sonstige Messinstrumente, sowie die EISCAT VHF und UHF-Radars in Tromsø. Die in Andøya gestarteten instrumentierten Nutzlasten wurden in enger Kooperation mit anderen internationalen Einrichtungen hergestellt und wissenschaftlich betreut. Die wichtigsten Arbeitsgruppen aus dem In- und Ausland, mit denen das IAP im Rahmen der vierten und letzten ECOMA-Raketenkampagne zusammengearbeitet hat, sind:

- Forsvarets Forskningsinstitut (FFI), Kjeller, Norwegen
- Meteorologisches Institut der Universität Stockholm (MISU), Schweden
- Technische Universität Graz, Österreich
- Universität Oslo, Norwegen

Die Raketenflüge wurden mit Hilfe der Mobilen Raketenbasis (MoRaba) der Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen, sowie mit dem Personal der Andøya Rocket Range durchgeführt. Allen beteiligten Gruppen sei herzlichst für die sehr erfolgreiche Arbeit gedankt.

2 Wissenschaftliche Ergebnisse

2.1 Der ECOMA-Partikeldetektor

Der ECOMA-Partikeldetektor wurde am IAP im Rahmen des ersten Teiles des ECOMA-Projektes entwickelt, um die Konzentration kleinster, nanometergroßer Staubpartikel meteorischen Ursprungs zu messen. Bei dem Detektor handelt es sich um eine Kombination aus einem Faraday-Cup und einer Xenon-Blitzlampe, die zur Photoionisation der nachzuweisenden Partikel dient. Eine detaillierte Beschreibung des Detektors findet sich in [31] und [32].

Der Aufbau des Detektors besteht aus einer zylinderförmigen Messanordnung, in deren Zentrum sich eine Xenon-Blitzlampe befindet. Freie Elektronen und leichte positive Ionen werden am Eindringen in das Innere des Detektors durch zwei Abschirmgitter (mit Spannung von $\pm 3\text{-}6\text{ V}$ im Vergleich zur Struktur der Höhenforschungsrakete) gehindert. Im Inneren dieser Messanordnung befindet sich die Messelektrode, auf der die Einschläge von geladenen Partikeln als Strom nachgewiesen werden.

Das empfindliche Elektrometer hat zwei Kanäle, die mit Frequenzen von 1 und 100 kHz abgetastet werden. Die Blitzfrequenz beträgt 16 Hz. Eine schematische Darstellung des Detektors und des dazugehörenden Messprinzips ist unten skizziert.

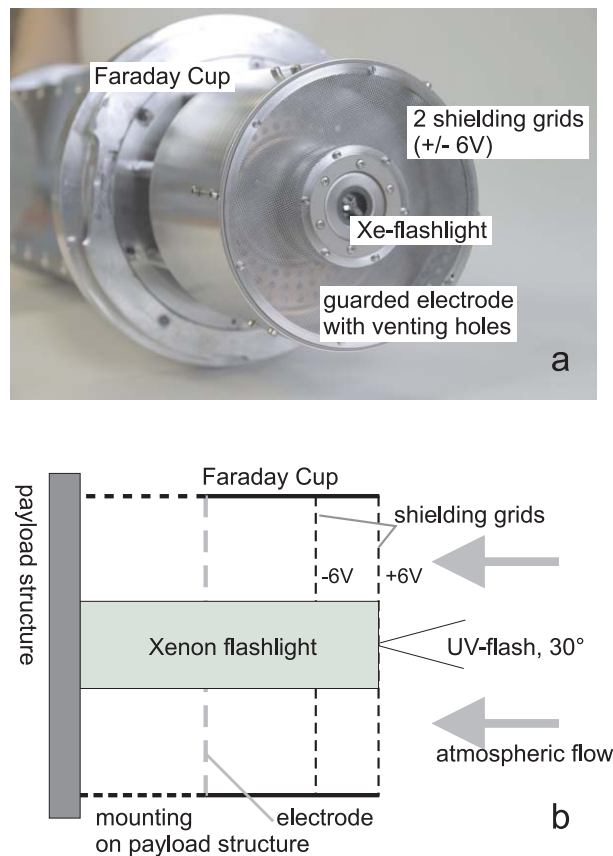


Abb. 2.1: Photo und schematischer Aufbau des ECOMA-Partikeldetektors

Die durch den Blitz erzeugten Photoelektronen werden als kurzer Strompuls im Detektor registriert. Die Dauer dieses Pulses ist kürzer als 50 Mikrosekunden. Um diesen kurzen Puls auflösen zu können, werden daher die ersten 48 Messpunkte mit einer Frequenz von 100 kHz aufgenommen. Da Partikel aller Größenklassen photoionisiert werden, enthalten diese Messungen Information über die totale Teilchendichte. Zwischen zwei Blitzereignissen wird im zweiten Messkanal, der mit einer Frequenz von 1 kHz abgetastet wird, der Strom aufgrund natürlich geladener Partikel registriert, die schwer genug sind und damit über genügend kinetische Energie verfügen, um in das

Detektorvolumen einzudringen.

2.2 Ergebnisse zur Ladungsbilanz während ECOMA-2010

Wie bereits oben dargestellt sollte im Rahmen der ECOMA-2010 Kampagne der Einfluss eines Meteorschauers auf die Eigenschaften der Meteorstaubpartikel (MSP) untersucht werden. Konkret wurde hierzu der Geminiden-Meteorschauer ausgewählt, dessen Aktivitätszeitraum alljährlich auf die Periode vom 7 - 17. Dezember fällt, wobei ein Maximum der Schaueraktivität am 13. und 14. Dezember zu verzeichnen ist. Dabei ist es das besondere Merkmal der Geminiden, dass sie über eine ähnliche Geschwindigkeitsverteilung wie die sporadischen Meteore verfügen und somit im selben Höhenbereich von etwa 70 - 110 km verfliegen und dort ihr Material deponieren.

Während der ECOMA-2010 Kampagne wurde die Meteoraktivität mit einem nahe der Andøya Rocket Range (ARR) gelegenen Meteorradar des IAP registriert. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abb. 2.2 dargestellt.

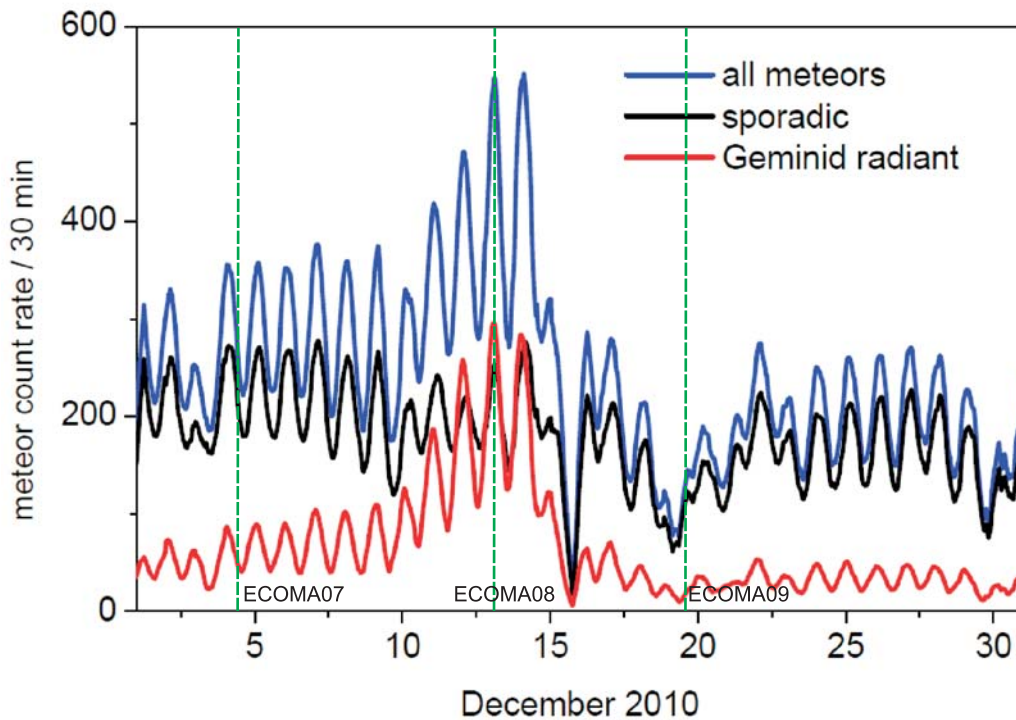


Abb. 2.2: Zeitliche Variation der halbstündigen Meteorzählrate beobachtet mit dem Meteorradar des IAP nahe der Andøya Rocket Range im Dezember 2010. Die blaue Kurve zeigt die totale Zählrate, die rote zeigt nur Meteore aus dem Quadranten der Geminiden und die schwarze Kurve zeigt den Untergrund durch sporadische Meteore. Grüne vertikale Linien kennzeichnen die Startzeiten der ECOMA-Nutzlasten.

Diese Abbildung zeigt halbstündige Meteorzählraten während des gesamten Dezembers 2010. Dabei zeigt die blaue Kurve die totale Zählrate, die rote Kurve zeigt Meteore aus dem Quadranten der Geminiden und die schwarze Kurve zeigt den Untergrund durch sporadische Meteore. Die Abbildung macht deutlich, dass der Meteorfluss während der Geminiden um etwa einen Faktor 2 ansteigt. Damit stellen die Geminiden die stärkste kurzzeitige Erhöhung des Meteoreintrages in die mittlere Atmosphäre dar und sollten somit ideal geeignet sein, um entsprechende Effekte auf MSP zu untersuchen.

Die Kampagnenplanung sah vor, je eine Höhenforschungsrakete vor dem Beginn der Geminiden, eine am Maximum der Aktivität und eine nach Abklingen der Schaueraktivität zu starten. Die entsprechenden Startzeitpunkte der ECOMA-Nutzlasten mit den Fluglabels ECOMA07, ECOMA08 und ECOMA09 sind in Abb. 2.2 als grüne vertikale Striche eingetragen. Dies belegt,

dass dieses operationelle Ziel in der Tat erreicht werden konnte.

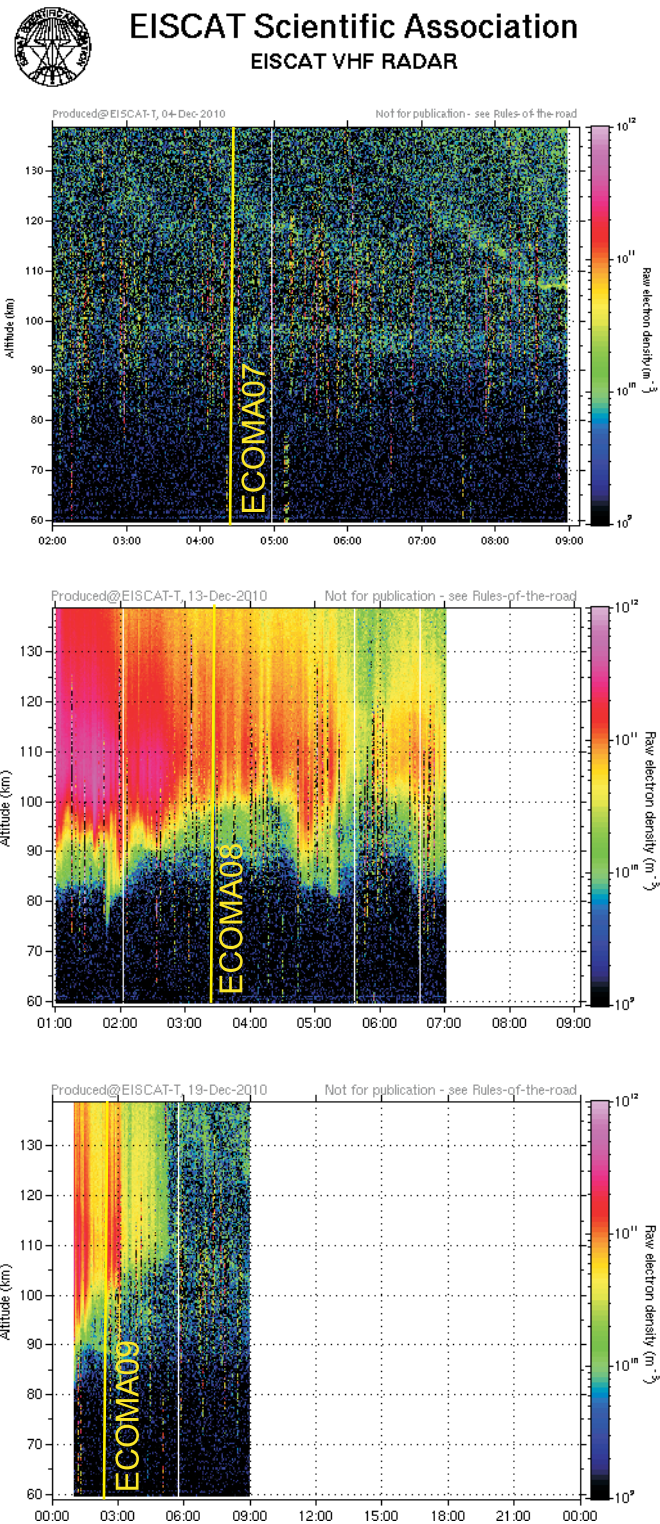


Abb. 2.3: Zeit-Höhenvariation der Elektronendichte (farbkodiert, siehe Farbbalken rechts) am 4., 13. und 19. Dezember 2010, d.h. den Starttagen der ECOMA-Nutzlasten. Gelbe vertikale Linien kennzeichnen die Startzeiten der ECOMA-Nutzlasten.

Neben der zeitlichen Koordinierung in Bezug auf die Aktivität der Geminiden war ferner geplant, die ECOMA-Nutzlasten unter ruhigen bzw. wenig gestörten ionosphärischen Bedingungen zu starten, wobei mit ionosphärischen Bedingungen hier die Ionisation in der D-Schicht unterhalb

von etwa 90 km gemeint ist. Abbildung 2.3 zeigt entsprechende Messungen der Elektronendichte mit dem EISCAT VHF Radar, welches sich etwa 130 km nordöstlich von der ARR nahe Tromsø befindet. Daraus ist ersichtlich, dass während aller ECOMA-Flüge die Elektronendichte unterhalb von 90 km Höhe weniger als etwa 10^{10} m^{-3} betrug, so dass auch dieses Startkriterium während aller drei Flüge erfüllt werden konnte.

Als nächstes zeigt Abbildung 2.4 eine Übersicht der mit den Instrumenten der ECOMA-Nutzlast vorgenommenen Plasmamessungen, also von Elektronen, positiven Ionen und geladenen MSP.

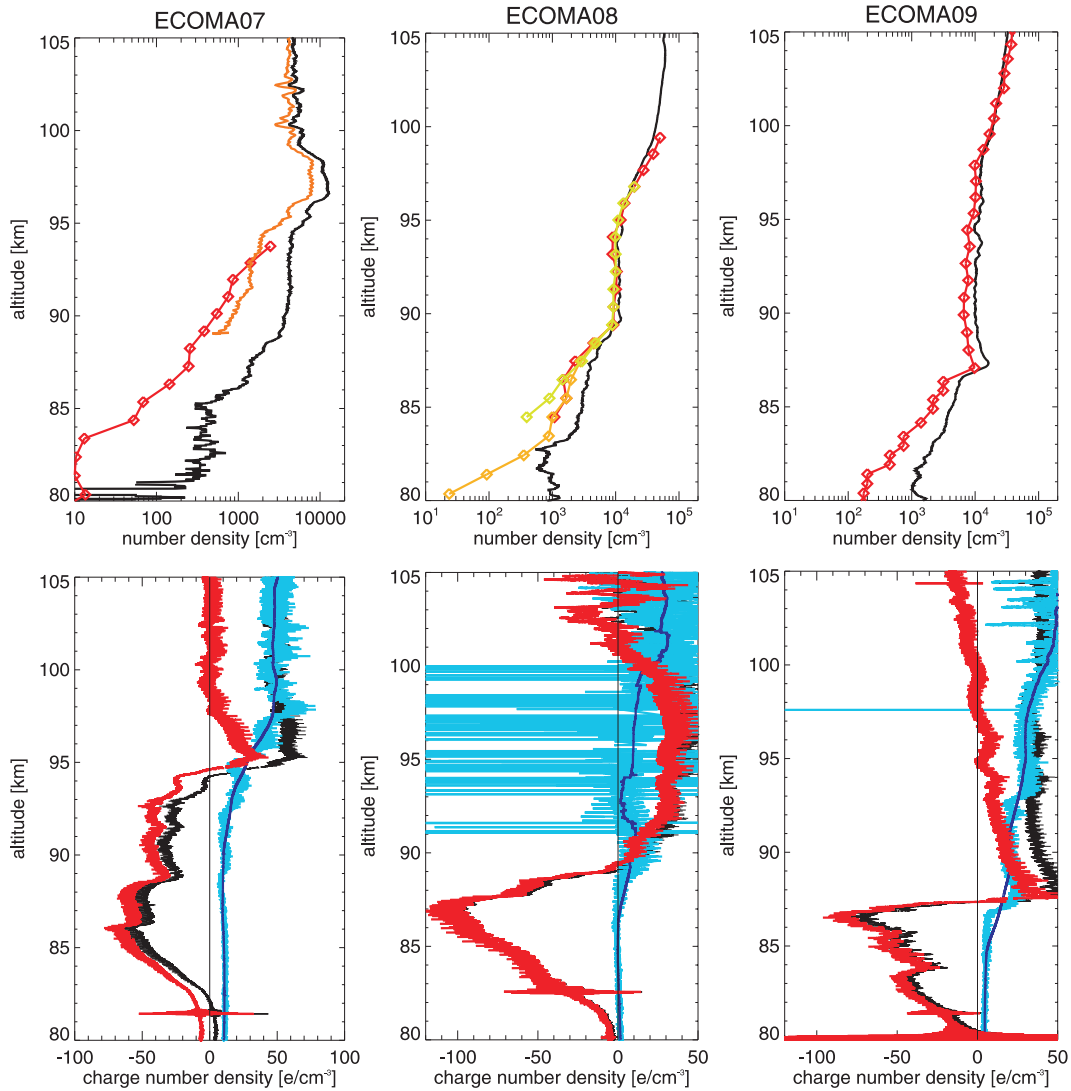


Abb. 2.4: Überblick über alle Messungen von Plasmamessungen während der ECOMA-Kampagne 2010. Die oberen Bildteile zeigen Messungen von Elektronen (verschiedenfarbige Symbole) und positiven Ionen (schwarze Linien) Faraday-Rotationsmessungen bzw. Sondenmessungen. Die unteren Bildteile zeigen die dazugehörigen Messungen geladener Meteorstaubpartikel. Dabei sind Messungen während des aufsteigenden Astes der Flugtrajektorie in Schwarz und solche während des absteigenden Astes in Hellblau gekennzeichnet. Differenzbildung zwischen beiden Profilen erlaubt die weitgehende Eliminierung von Kontaminationsströmen durch positive Ionen. Die korrigierten Profile sind in Rot dargestellt.

Die Messungen von Elektronen und positiven Ionen zeigen in allen drei Fällen eine gute Übereinstimmung in großen Höhen, divergieren allerdings zu niedrigeren Höhen. In allen drei Fällen liegt dabei die Elektronendichte unterhalb der Dichte positiver Ionen, was darauf hinweist, dass es einen weiteren Träger negativer Ladungen geben muss, so dass Ladungsneutralität erfüllt ist. Die in den unteren Bildabschnitten von Abbildung 2.4 gezeigten Ergebnisse zu negativ geladenen MSP

zeigen, dass MSP für diese Diskrepanz zwischen Elektronen und positiven Ionen verantwortlich sind: Genau in den Höhen, in denen Elektronen und positive Ionen voneinander abweichen, wird die Oberkante der MSP-Schicht detektiert. Dabei ist es wichtig, zur Kenntnis zu nehmen, dass die hier gezeigten Messungen durch geladene MSP hervorgerufen werden, die in den ECOMA-Detektor eindringen und ihre Ladung an die Elektrode des Detektors abgeben (siehe auch Kapitel 2.1). Da die Eindringwahrscheinlichkeit zu niedrigen Höhen hin aufgrund der zunehmenden Luftdichte und der Aerodynamik des Raketenfluges stark abnimmt, muss das Abklingen des MSP-Signals unterhalb von etwa 80 km als Artefakt interpretiert werden [33]. Da dieser Effekt allerdings für alle drei Flüge gleich ist, können trotzdem in einem nächsten Schritt die Messungen während der drei Raketenflüge miteinander verglichen werden. Dabei ist noch zu beachten, dass nur solche Höhenbereiche als echte Messung geladener MSP interpretiert werden, welche eine negative Ladung der Teilchen zeigen. Demgegenüber zeigt ein Vergleich der Upleg- und Downlegdaten (schwarze und hellblaue Kurven in Abbildung 2.4), dass in großen Höhen registrierte positive Ströme durch positive Ionen erzeugt werden, die trotz der Abschirmung des Detektors in denselben eindringen konnten. Die resultierenden Profile negativ geladener MSP sind in Abbildung 2.5 gegenübergestellt.

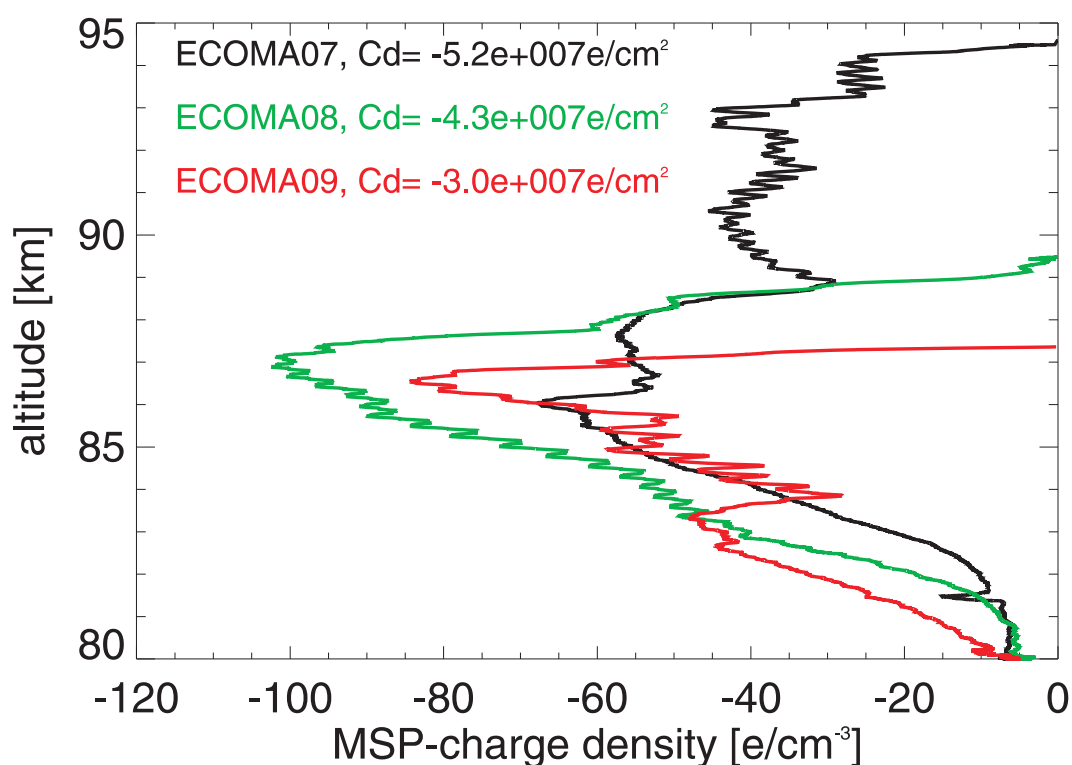


Abb. 2.5: Überblick über alle drei Messungen negativ geladener Meteorstaubpartikel während ECMA 2010. Neben dem Fluglabel sind in der Abbildung auch die Säulendichten negativer Partikelladungen (Cd = column density) angegeben.

Abbildung 2.5 zeigt, dass während ECMA07 geladene MSP in einem wesentlich größeren Höhenbereich registriert wurden als in den beiden nachfolgenden Flügen, nämlich zwischen 81 und 94 km Höhe im Vergleich zu 80 - 87 km bzw. 80 - 90 km Höhe. Ferner fällt auf, dass das Maximum der MSP-Ladungsdichte im Fall von ECMA08, also während der maximalen Aktivität der Geminiden, am stärksten ausgeprägt ist. Abbildung 2.5 zeigt ferner auch die Säulendichten der beobachteten negativen MSP-Ladung, wobei auffällt, dass diese im Flug ECMA07 maximal war und danach von Flug zu Flug geringer wurde. Damit ist ein Zusammenhang der Variation der MSP-Ladungsdichte mit der Meteorrate zumindest nicht offensichtlich, was darauf hinweist, dass die Zeitkonstanten der MSP-Entstehung zu lang sind, um eine 1:1-Korrelation des Masseneintrages in die mittlere Atmosphäre (gemessen hier über die Meteorrate) mit der MSP-Konzentration und

MSP-Ladungsdichte zu erzeugen.

2.3 Ergebnisse zur MSP-Zusammensetzung während ECOMA-2010

Offensichtlich stellt sich die Frage, ob auch der zweite ECOMA-Datenkanal, in dem die durch die Blitzlampe erzeugten Photoelektronen registriert werden, ähnliche Ergebnisse liefert, die auf einen geringen bis gar keinen Einfluss kurzzeitiger Variationen des meteorischen Masseneintrages auf die Eigenschaften von MSP hinweisen. Bevor wir zu den entsprechenden Ergebnissen kommen, muss allerdings zunächst auf eine wesentliche Modifikation des ECOMA Partikeldetektors eingegangen werden. Dieser modifizierte Detektor wurde bei den Flügen ECOMA07 und ECOMA09 eingesetzt, während bei ECOMA08 noch der alte Detektortyp zum Einsatz kam.

Abbildung 2.6 zeigt ein Foto des modifizierten Detektors, auf dem die Veränderung zur ursprünglichen Version deutlich sichtbar ist.

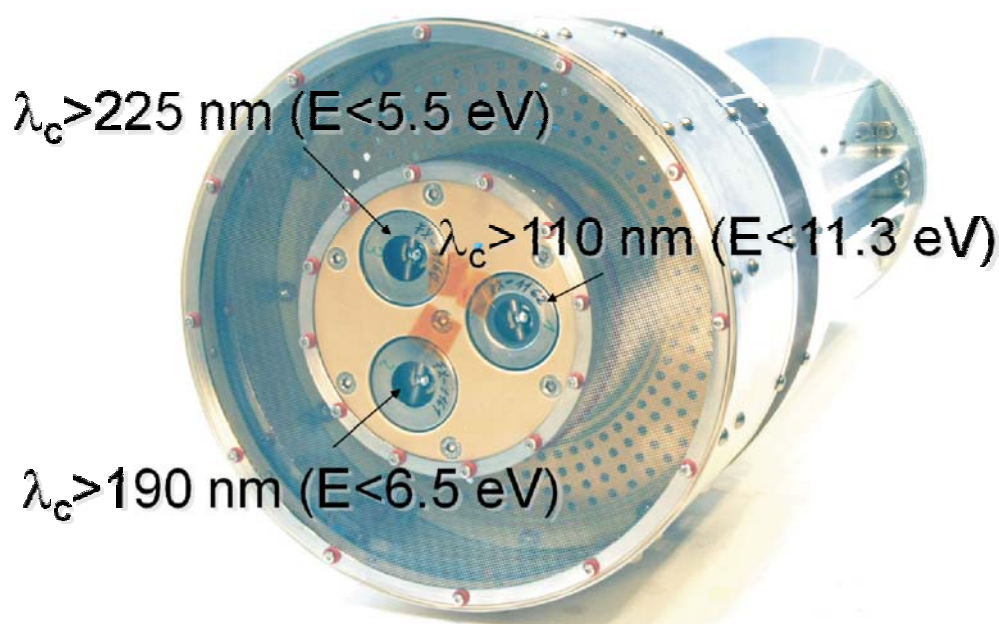


Abb. 2.6: Foto des modifizierten ECOMA-Partikeldetektors mit drei verschiedenen Blitzlampen, die sich jeweils durch unterschiedliche maximale Photonenenergien unterscheiden.

Während in allen früheren Kampagnen ein Detektor mit nur einer Blitzlampe eingesetzt wurde (siehe Abbildung 2.1), wurde der neue Detektortyp um zwei zusätzliche Blitzlampen erweitert. Dabei ist hervorzuheben, dass es sich hierbei um im wesentlichen identische Lampentypen der FX1160er-Serie des Herstellers Perkin-Elmer handelt, die sich nur im gewählten Fenstermaterial unterscheiden. Während die Lampen daher im Prinzip identische Spektren emittieren, sorgen die verschiedenen Fenstermaterialien dafür, dass dieses Spektrum zu kurzen Wellenlängen hin bei verschiedenen Grenzwellenlängen begrenzt wird (siehe Abbildung 2.7). Konkret betragen diese Grenzwellenlängen für den bisher eingesetzten Lampentyp FX1162 110 nm (entsprechend einer maximalen Photonenenergie von 11.3 eV), und für die beiden zusätzlichen Lampentypen FX1161 und FX1160 190 nm (6.5 eV) und 225 nm (5.5 eV).

Die Grundidee hinter dem Einsatz der zusätzlichen Wellenlängen ist es, aus den gemessenen Photoelektronenströmen für verschiedene Energiebereiche Hinweise auf die Zusammensetzung der MSP abzuleiten, also das Prinzip der Photoelektronenspektroskopie in einfacher Form in diesem Raketeninstrument zur Anwendung zu bringen. Dabei sei betont, dass die Vergleichbarkeit der Messungen mit dem neuen Detektortyp mit entsprechenden Messungen mit dem alten Detektortyp in jedem Fall gegeben ist, da in beiden Fällen der Lampentyp FX1162 zum Einsatz kommt.

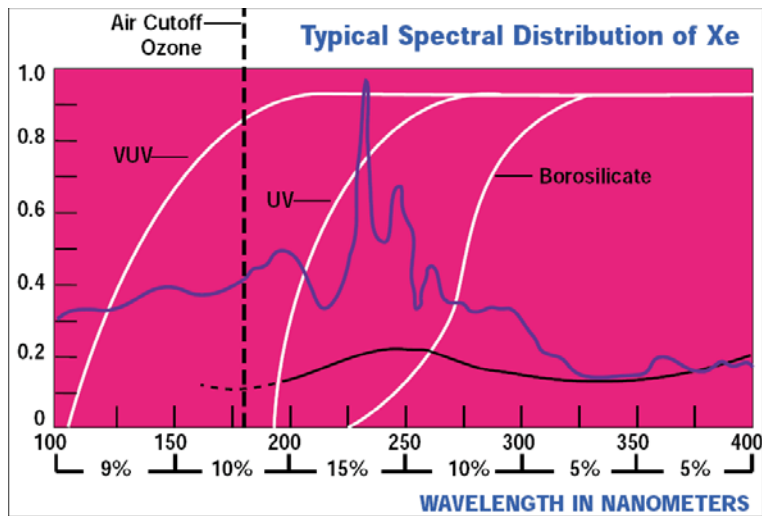


Abb. 2.7: Typisches Spektrum einer gepulsten Xenon-Blitzlampe (blaue Linie) sowie die Durchlasscharakteristik verschiedener Fenstermaterialien (weiße Linien) nach Angaben des Hersteller Perkin-Elmer.

Zur Verdeutlichung des Messprinzips mit dem modifizierten ECOMA-Partikeldetektor zeigt Abbildung 2.8 einen kurzen Ausschnitt von Rohdaten, die während des Fluges ECOMA07 aufgenommen wurden. Deutlich sind Photoelektronenpeaks zu erkennen, die kurz nach Auslösen eines Blitzereignisses an der Elektrode registriert werden. Da die verschiedenen Lampentypen sequentiell betrieben werden, sind die dazugehörigen Peaks je nach Lampentyp verschieden hoch, wobei der Lampentyp mit der größten maximalen Photonenenergie folgerichtig auch zu den größten Photoelektronenpeaks führt. Zur weiteren Datenverarbeitung wurden diese Peaks in den gemessenen Zeitreihen identifiziert und getrennt für die verschiedenen Lampentypen abgespeichert. Die daraus folgenden Photoelektronenströme für die drei verfügbaren Energiebereiche und die beiden Flüge ECOMA07 und ECOMA09 sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

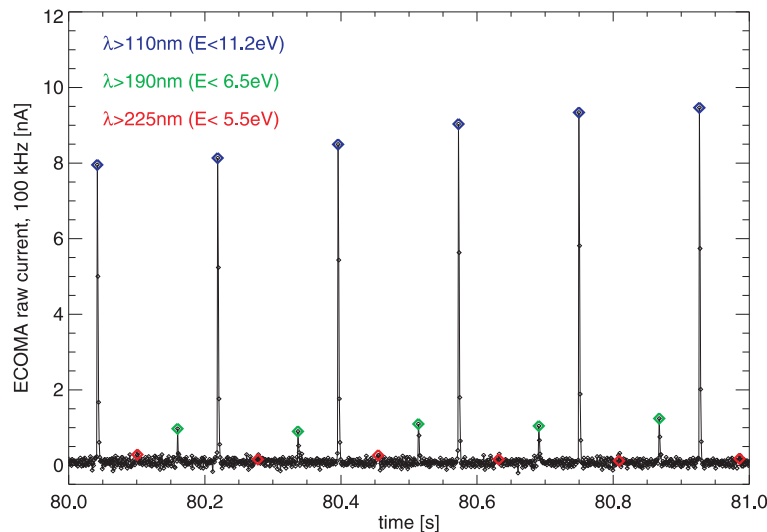


Abb. 2.8: Zeitreihe von Rohdaten des Photoelektronenkanals des ECOMA-Partikeldetektors während des Fluges ECOMA07. Die mit farbigen Symbolen gekennzeichneten Strommaxima bilden den Photoelektronenstrom für die jeweils dazugehörige Blitzlampe. Die unterschiedlichen Blitzlampen (und damit unterschiedlichen maximalen Photonenenergien) sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet (siehe Legende).

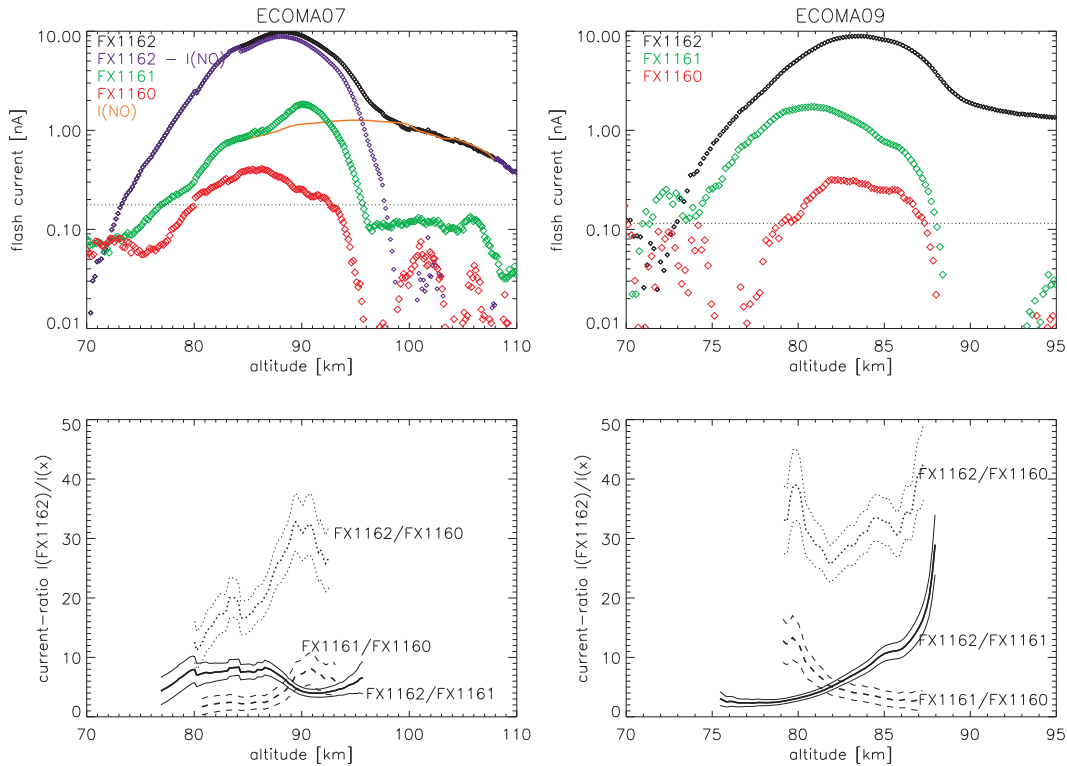


Abb. 2.9: Obere Bildteile: Photoelektronenströme während der Flüge ECOMA07 (links) und ECOMA08 (rechts). Schwarze, grüne und rote Symbole markieren Ströme als Folge unterschiedlicher Blitzlampentypen (siehe Legende). Die gepunktete horizontale Linie markiert das 2σ -Rauschniveau der ungeglätteten Messungen. Im linken Bildteil ist ferner ein Strombeitrag zum Photoelektronenstrom durch die Lampe FX1162 gezeigt, der aus unabhängigen Messungen der NO-Dichte mit Photometern der Universität Stockholm bestimmt wurde. Die dunkelblauen Symbole zeigen den entsprechend korrigierten Photoelektronenstrom durch Meteorstaubpartikel. Untere Bildteile: Verhältnisse von Photoelektronenströmen für Höhenbereiche, in denen beide Ströme das 2σ -Rauschniveau der ungeglätteten Messungen überschreiten.

In beiden Flügen fällt auf, dass alle drei eingesetzten Blitzlampen zu entsprechenden Photoelektronenströmen führen, die sich deutlich vom Rauschen des eingesetzten Elektrometers (hier gekennzeichnet durch die horizontale gepunktete Linie) unterscheiden. Allein aus der Tatsache, dass die Blitzströme der Lampentypen FX1161 und FX1160 von Null verschieden sind, erlaubt es uns, SiO_2 als mögliche Zusammensetzung der Partikel auszuschließen, da die entsprechende Austrittsarbeit von etwa 10 eV von diesen beiden Lampentypen nicht erreicht wird. Dies ist ein bedeutendes Ergebnis, da SiO_2 in der Literatur in der Vergangenheit oft als möglicher Kandidat für die Zusammensetzung der Partikel genannt wurde [34]. Es fällt ferner auf, dass die durch die schwächste Lampe erzeugten Photoelektronenströme nur noch knapp über dem Rauschniveau liegen und der entsprechende Höhenbereich im Vergleich zu den anderen Lampen stark eingeschränkt ist. Dies deutet darauf hin, dass die Austrittsarbeit der MSP nur knapp unterhalb der von der Lampe bereitgestellten maximalen Photonenenergie von 5.5 eV liegt, was darauf hinweist, dass Metalloxide ein möglicher Bestandteil der MSP-Zusammensetzung sein könnten.

Ferner ist zu bemerken, dass die von der energiereichsten Blitzlampe erzeugten Photoelektronenströme oberhalb von 100 km bzw. oberhalb von 90 km eine Art „Schulter“ zeigen, die nicht zu dem entsprechenden Höhenverlauf der beiden anderen Lampen zu passen scheint. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Tatsache, dass die energiereichste Lampe neben den im Fokus stehenden MSP auch NO ionisieren kann, von dem wir aufgrund theoretischer Argumente schon seit den ersten Messungen vermutet haben, dass es zu der oben beschriebenen „Schulter“ führt [31]. Im Rahmen des Fluges ECOMA07 konnte dieser Sachverhalt in der Tat bewiesen werden, da durch die erfolgreichen Photometermessungen von NO der Universität Stockholm eine unabhängige

ge Messung dieses Spurengases zu Verfügung stand. Ausgehend von diesen Messungen wurde der vom ECOMA Partikeldetektor zu erwartende Photoelektronenstrom berechnet [33], welcher in Abbildung 2.9 als orangene Linie gezeigt ist. In der Tat erzeugt also der Beitrag von NO zum Messsignal die oben beschriebene „Schulter“ während das um den Beitrag von NO bereinigte Messsignal nun für alle drei Blitzlampen einen ähnlichen Höhenverlauf zeigt.

Im Vergleich des Fluges ECOMA07 zu ECOMA09 fällt hier auf, dass der Höhenbereich, in dem Photoelektronen registriert werden, während des Fluges ECOMA07 um mehr als 10 km größer ist als während des Fluges ECOMA09, was mit den entsprechenden Strömen durch direkten Partikeleinfall in die Detektoren konsistent ist (siehe Abbildung 2.5). Ferner zeigt Abbildung 2.9 noch die Verhältnisse der gemessenen Photoelektronenströme der verschiedenen Blitzlampentypen (untere Panels). Diese zeigen in allen Fällen eine Höhenvariation, was auf eine entsprechende höhenabhängige Variation der Zusammensetzung der MSP hinweist. Die Existenz einer Höhenvariation schließt ferner aus, dass Unterschiede in den von den Lampen emittierten Photonenflüssen für die beobachteten Unterschiede zwischen den von verschiedenen Lampen erzeugten Photoelektronenströme (alleine) verantwortlich sind. Außerdem fällt ins Auge, dass die entsprechende Höhenvariation sich von Flug ECOMA07 zu ECOMA09 signifikant unterscheidet. Auf diesen Punkt werden wir im Zusammenhang der anschließenden Diskussion des Fluges ECOMA08 zurückkommen.

Als nächstes wenden wir uns daher einem Vergleich der Photoelektronenmessungen während aller drei Flüge zu. Wie oben beschrieben, können dafür lediglich die vom Lampentyp FX1162 hervorgerufenen Ströme betrachtet werden, da nur dieser Lampentyp bei allen drei Flügen eingesetzt wurde. Bevor wir uns diesen Ergebnissen zuwenden, seien allerdings noch zunächst einige Laborergebnisse bezüglich der Vergleichbarkeit der drei eingesetzten Lampen gezeigt. Der eingesetzte Laboraufbau ist in Abbildung 2.11 gezeigt.

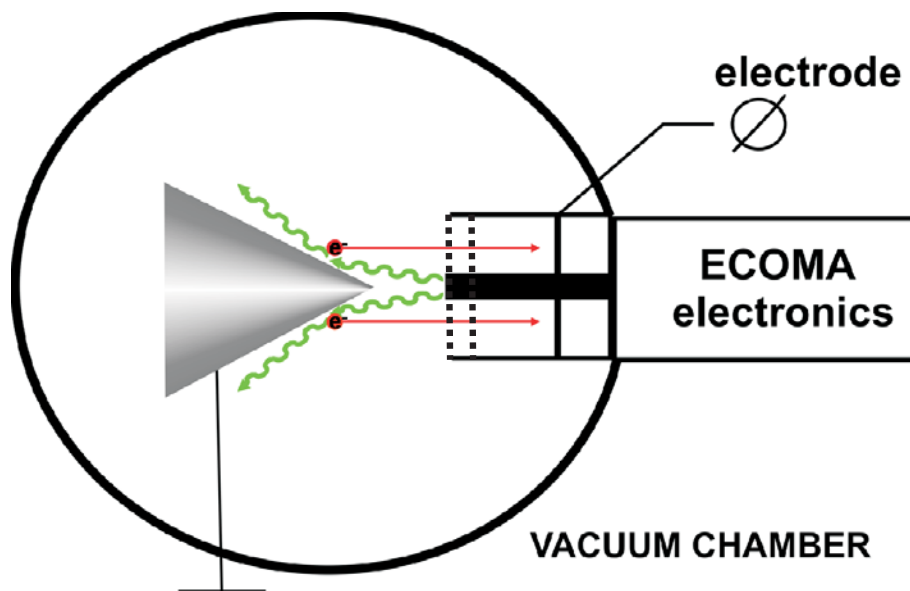


Abb. 2.10: Laboraufbau zur Vermessung von Photoelektronenströmen der bei ECOMA eingesetzten Blitzlampen. Um Reflexionen von Photonen ins Detektorvolumen zu minimieren wird ein konisches Target angeblitzt, welches die Photonen aus dem Gesichtsfeld des Detektors leitet.

Der ECOMA-Detektor wird in einer Vakuumkammer montiert und auf ein konisches Target gerichtet, an dem durch Blitzereignisse Photoelektronen ausgelöst werden. Dabei wurde die Form des Targets so gewählt, dass Reflexionen von Blitzphotonen in das Detektorvolumen minimiert werden. Entsprechende Messungen wurden für jede Lampe in einem Druckbereich von 0.001 mbar bis 5 mbar mehrmals durchführt, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu prüfen. Entsprechende Ergebnisse sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

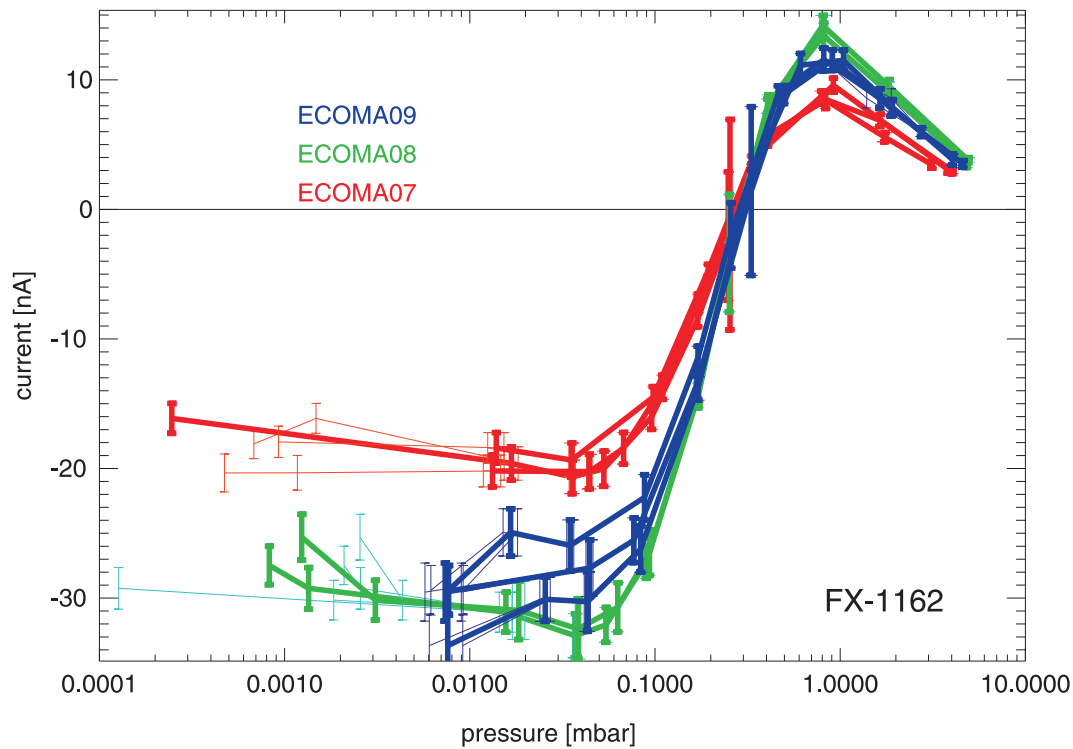


Abb. 2.11: Photoelektronenströme verschiedener Blitzlampen als Funktion des Umgebungsdruckes. Oberes Panel: Kennlinien des Lampentypes FX1162. Mittleres Panel: wie oben aber für Lampentyp FX1161. Unteres Panel: wie oben aber für Lampentyp FX1160.

Abbildung 2.11 zeigt, dass die beobachteten Photoströme (hier mit negativem Vorzeichen gezeigt) im Druckbereich von 0.001 bis 0.1 mbar ein Plateau erreichen, welches von Lampe zu Lampe im Bereich von maximal 30 % variiert. Zu größeren Drücken hin fallen die gemessenen Ströme ab und wechseln bei etwa 0.3 mbar sogar das Vorzeichen. Das Auftreten positiver Ströme kann hierbei nur durch Reflexionen der Blitzphotonen zurück ins Detektorvolumen und das Auslösen von Photoelektronen aus der Elektrode erklärt werden. Korrigiert man die gemessenen Ströme um diesen Offset durch reflektierte Blitzphotonen, so sieht man, dass die Photoströme erst bei etwa 1 mbar auf Null abgeklungen sind, was mit den Messungen in der Atmosphäre konsistent ist und über die Druckabhängigkeit der mittleren freien Weglänge der Photoelektronen erklärt werden kann [31].

Bedeutender für die Interpretation unserer Flugdaten ist allerdings die Tatsache, dass sich die Lampenkennlinien der Flüge ECOMA08 und ECOMA09 nur unwesentlich unterscheiden, während die Kennlinie für die im Flug ECOMA07 eingesetzte Lampe um etwa 30 % niedrigere Ströme zeigt. Dies deutet auf einen entsprechend geringeren Photonenfluss von dieser Lampe hin, der in den Messergebnissen entsprechend berücksichtigt werden muss.

Auf der Grundlage dieser Laborergebnisse betrachten wir nun abschließend den direkten Vergleich der Photoelektronenströme der Flüge ECOMA07 - ECOMA09, welcher in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt die bereits oben diskutierten Unterschiede zwischen den Flügen ECOMA07 und ECOMA09, nämlich den deutlich unterschiedlichen Höhenbereich. Der markanteste Unterschied zwischen den drei Flügen ist allerdings die Tatsache, dass der Photoelektronenstrom von Flug ECOMA08 um etwa eine Größenordnung geringer ausfällt als die entsprechenden Ströme der beiden anderen Flüge. Interessanter Weise steht dies auch im Widerspruch zu den in Abbildung 2.5 gezeigten Ergebnisse der Ladungsdichte negativ geladener Partikel, die zeigten, dass während des Fluges ECOMA08 zwar weniger negativ geladene Partikel registriert wurden als in Flug ECOMA07 aber immer noch mehr als in Flug ECOMA09. Da Flug ECOMA08 aber am Maximum der Schaueraktivität der Geminiden durchgeführt wurde, liegt daher die Vermutung

nahe, dass die Geminiden die Eigenschaften der MSP so verändert haben, dass der entsprechende Wirkungsquerschnitt für die Auslösung von Photoelektronen stark reduziert wurde. Da bekannt ist, dass die Geminiden eine andere Zusammensetzung besitzen als die sporadischen Meteore, die die Quelle von MSP unter ungestörten Bedingungen darstellen, liegt also die Vermutung nahe, dass die Geminiden kurzfristig zu einer Veränderung der Zusammensetzung der MSP geführt haben. Dies ist ein aufsehenerregendes Ergebnis, da bisher die Zusammensetzung von MSP als nicht variabel angesehen wurde.

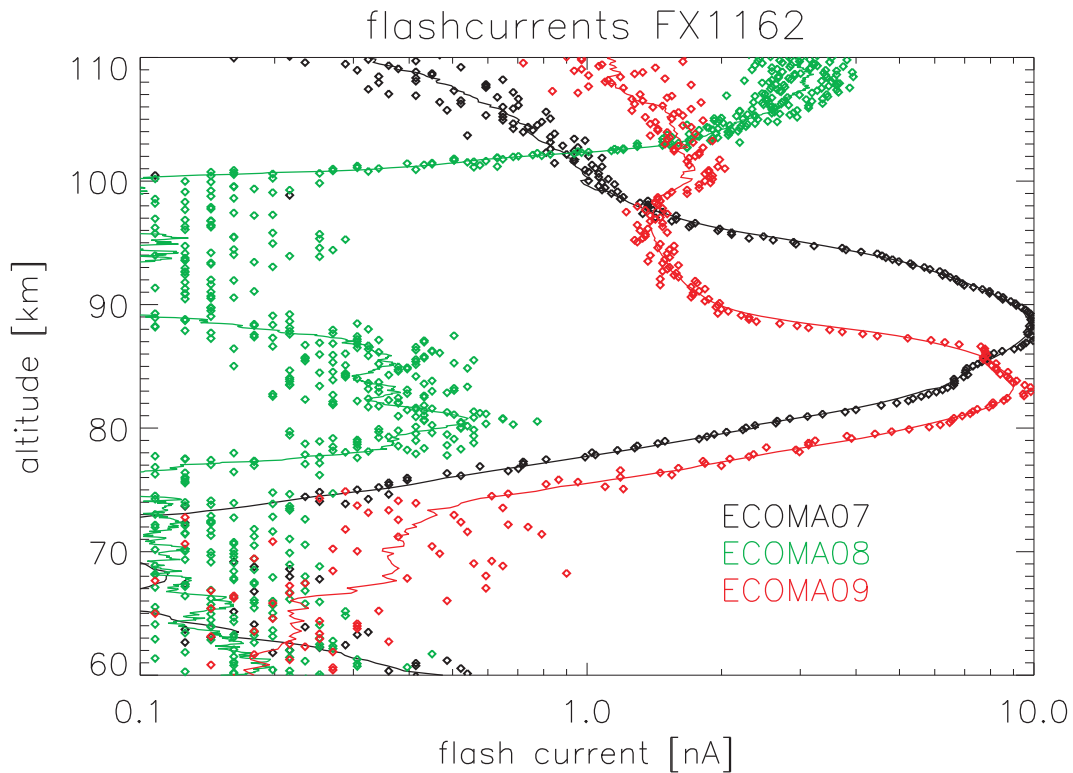


Abb. 2.12: Durch Photonen des Lampentypes FX1162 erzeugte Photoelektronenstromprofile für die Flüge ECOMA07, ECOMA08 und ECOMA09.

Entsprechende Auswirkungen für unser Verständnis der Mikrophysik der MSP und die damit zusammenhängenden Fragen, die in Kapitel 1.2 diskutiert wurden, sollten im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte untersucht werden.

3 Referenzen

Bibliographie

- [1] O. Jesse. Auffallende Erscheinungen am Abendhimmel. *Met. Zeit.*, 2:311–312, 1885.
- [2] G. E. Thomas. Is the polar mesosphere the miner’s canary of global change ? *Adv. Space Res.*, 18(3):149–158, 1996.
- [3] F.-J. Lübken. Thermal structure of the Arctic summer mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 104:9135–9149, 1999.
- [4] C. Seele and P. Hartogh. Water vapor of the polar middle atmosphere: annual variation and summer mesosphere conditions as observed by ground-based microwave spectroscopy. *Geophys. Res. Lett.*, 26:1517–1520, 1999.
- [5] F.-J. Lübken, K.-H. Fricke, and M. Langer. Noctilucent clouds and the thermal structure near the Arctic mesopause. *J. Geophys. Res.*, 101:9489–9508, 1996.
- [6] G. von Cossart, J. Fiedler, and U. von Zahn. Size distributions of nlc particles as determined from 3-color observations of nlc by ground-based lidar. *Geophys. Res. Lett.*, 26:1513–1516, 1999.
- [7] M. Gadsden. A secular change in noctilucent cloud occurrence. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52:247–251, 1990.
- [8] M. Gadsden. The north-west europe data on noctilucent clouds: a survey. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60:1163–1174, 1998.
- [9] R. A. Akmaev and V. I. Formichev. Cooling of the mesosphere and lower thermosphere due to doubling of CO₂. *Ann. Geophys.*, 16:1501–1502, 1998.
- [10] R. A. Akmaev and V. I. Formichev. A model estimate of cooling in the mesosphere and lower thermosphere due to the CO₂ increase over the last 3–4 decades. *Geophys. Res. Lett.*, 27:2113–2116, 2000.
- [11] F.-J. Lübken. Nearly zero temperature trend in the polar summer mesosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 27:3603–3606, 2000.
- [12] J. J. Olivero and G. E. Thomas. Evidence for changes in greenhouse gases in the mesosphere. *Adv. Space Res.*, in print, 2000.
- [13] M. Gadsden and W. Schroeder. *Noctilucent Clouds*. Springer Verlag, Berlin, 1989.
- [14] G. Witt. The nature of noctilucent clouds. *Space Res.*, IX:157–169, 1969.
- [15] T. Sugiyama. Ion-recombination nucleation and growth of ice particles in noctilucent clouds. *J. Geophys. Res.*, 99:3915–3929, 1994.
- [16] D. M. Hunten, R. P. Turco, and O. B. Toon. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 37:1342–1357, 1980.
- [17] R. P. Turco, O. B. Toon, R. C. Whitten, R. G. Keesee, and D. Hollenbach. Noctilucent clouds: Simulation studies of their genesis, properties and global influences. *Planet. Space Sci.*, 3:1147–1181, 1982.
- [18] J. Rosinski and R. H. Snow. Secondary particulate matter from meteor vapors. *J. Meteorol.*, 16:56–62, 1977.

- [19] E. Jensen and G. E. Thomas. A growth-sedimentation model of polar mesospheric clouds: Comparisons with SME measurements. *J. Geophys. Res.*, 93:2461–2473, 1988.
- [20] E. Jensen, G. E. Thomas, and O. B. Toon. On the diurnal variation of noctilucent clouds. *J. Geophys. Res.*, 94:14,693–14,702, 1989.
- [21] E. Jensen and G. E. Thomas. Numerical simulations of the effects of gravity waves on noctilucent clouds. *J. Geophys. Res.*, 99:3421–3430, 1994.
- [22] J. Klostermeyer. A simple model of the ice particle size distribution in noctilucent clouds. *J. Geophys. Res.*, 103:28743–28752, 1998.
- [23] M. Rapp, F.-J. Lübken, A. Müllemann, G. E. Thomas, and E. J. Jensen. Small scale temperature variations in the vicinity of NLC: Experimental and model results. *J. Geophys. Res.*, 107(D19), doi:10.1029/2001JD001241, 2002.
- [24] P. Schulte and F. Arnold. Detection of upper atmospheric negatively charged micro-clusters by a rocket-borne mass spectrometer. *Geophys. Res. Lett.*, 19:2297–2300, 1992.
- [25] L. J. Gelinas, K. A. Lynch, M. C. Kelley, S. Collins, S. Baker, Q. Zhou, and J. S. Friedman. First observation of meteoric charged dust in the tropical mesosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 25:4047–4050, 1998.
- [26] P. Czechowsky, R. Rüster, and G. Schmidt. Variations of mesospheric structures in different seasons. *Geophys. Res. Lett.*, 6:459–462, 1979.
- [27] W. L. Ecklund and B. B. Balsley. Long-term observations of the arctic mesosphere with the MST radar at Poker Flat, Alaska. *J. Geophys. Res.*, 86:7775–7780, 1981.
- [28] J. Y. N. Cho, T. M. Hall, and M. C. Kelley. On the role of charged aerosols in polar mesosphere summer echoes. *J. Geophys. Res.*, 97:875–886, 1992.
- [29] M. Rapp and F.-J. Lübken. Electron temperature control of PMSE. *Geophys. Res. Lett.*, 27:3285–3288, 2000.
- [30] M. Rapp and F.-J. Lübken. Modelling of particle charging in the polar summer mesosphere: Part 1 – general results. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 63:759–770, 2001.
- [31] M. Rapp and I. Strelnikova. Measurements of meteor smoke particles during the ECOMA-2006 campaign: 1. Particle detection by active photoionization. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, pages 477–485, 2009.
- [32] M. Rapp, I. Strelnikova, B. Strelnikov, P. Hoffmann, M. Friedrich, J. Gumbel, L. Megner, U.-P. Hoppe, S. Robertson, S. Knappmiller, M. Wolff, and D. R. Marsh. Rocket-borne in-situ measurements of meteor smoke: charging properties and implications for seasonal variation. *J. Geophys. Res.*, 2010.
- [33] I. Strelnikova, M. Rapp, B. Strelnikov, G. Baumgarten, A. Brattli, K. Svenes, U.-P. Hoppe, M. Friedrich, J. Gumbel, and B. Williams. Measurements of meteor smoke particles during the ECOMA-2006 campaign: 2. Results. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, pages 486–496, 2009.
- [34] R. W. Saunders and J. M. C. Plane. A laboratory study of meteor smoke analogues: Composition, optical properties and growth kinetics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 68:2182 – 2202, 2006.

4 Liste der Veröffentlichungen im Rahmen des ECOMA-Projektes

In „peer reviewed journals“:

- [1] M. Rapp, J. Hedin, I. Strelnikova, M. Friedrich, J. Gumbel, and F.-J. Lübken. Observations of positively charged nanoparticles in the nighttime polar mesosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2005.
- [31] M. Rapp and I. Strelnikova. Measurements of meteor smoke particles during the ECOMA-2006 campaign: 1. Particle detection by active photoionization. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, pages 477–485, 2009.
- [33] I. Strelnikova, M. Rapp, B. Strelnikov, G. Baumgarten, A. Brattli, K. Svenes, U.-P. Hoppe, M. Friedrich, J. Gumbel, and B. Williams. Measurements of meteor smoke particles during the ECOMA-2006 campaign: 2. Results. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, pages 486–496, 2009.
- [4] M. Rapp, I. Strelnikova, B. Strelnikov, R. Latteck, G. Baumgarten, Q. Li, L. Megner, J. Gumbel, M. Friedrich, U.-P. Hoppe, and S. Robertson. First in situ measurement of the vertical distribution of ice volume in a mesospheric ice cloud during the ECOMA/MASS rocket-campaign. *Ann. Geophys.*, 27:755–766, 2009.
- [5] M. Rapp. Charging of mesospheric aerosol particles: the role of photodetachment and photoionization from meteoric smoke and ice particles. *Ann. Geophys.*, 27:2417–2422, 2009.
- [6] M. Rapp and S. Robertson. Preface: ECOMA/MASS: aerosol particles near the polar summer mesopause. *Ann. Geophys.*, 27, 2009.
- [7] M. Rapp and F.-J. Lübken. Comment on „Ice iron/sodium film as cause for high noctilucent cloud radar reflectivity“ by P. M. Bellan. *J. Geophys. Res.*, 114, 2009.
- [8] G. Baumgarten, J. Fiedler, K. H. Fricke, M. Gerding, M. Hervig, P. Hoffmann, N. Müller, P.-D. Pautet, M. Rapp, C. Robert, D. Rusch, C. von Savigny, and W. Singer. The noctilucent cloud (NLC) display during the ECOMA/MASS sounding rocket flights on 3 August 2007: morphology on global to local scales. *Ann. Geophys.*, 27:953–965, 2009.
- [9] S. Robertson, M. Horányi, S. Knappmiller, Z. Sternovsky, R. Holzworth, M. Shimogawa, M. Friedrich, K. Torkar, J. Gumbel, L. Megner, G. Baumgarten, R. Latteck, M. Rapp, U.-P. Hoppe, and M. E. Hervig. Mass analysis of charged aerosol particles in NLC and PMSE during the ECOMA/MASS campaign. *Ann. Geophys.*, 27:1213–1232, 2009.
- [10] A. Brattli, Ø. Lie-Svendsen, K. Svenes, U.-P. Hoppe, I. Strelnikova, M. Rapp, R. Latteck, and M. Friedrich. The ECOMA 2007 campaign: rocket observations and numerical modelling of aerosol particle charging and plasma depletion in a PMSE/NLC layer. *Ann. Geophys.*, 27:781–796, 2009.
- [11] B. Strelnikov, M. Rapp, I. Strelnikova, E. Engler, and R. Latteck. Small-scale structures in neutrals and charged aerosol particles as observed during the ECOMA/MASS rocket campaign. *Ann. Geophys.*, 27:1449–1456, 2009.
- [12] M. Friedrich, K. M. Torkar, W. Singer, I. Strelnikova, M. Rapp, and S. Robertson. Signatures of mesospheric particles in ionospheric data. *Ann. Geophys.*, 27(2):823–829, 2009.
- [13] L. Megner, M. Khaplanov, G. Baumgarten, J. Gumbel, J. Stegman, B. Strelnikov, and S. Robertson. Large mesospheric ice particles at exceptionally high altitudes. *Ann. Geophys.*, 27:943–951, 2009.

- [14] M. Friedrich and M. Rapp. News from the Lower Ionosphere: A Review of Recent Developments. *Surv. Geophys.*, 2009. doi: 10.1007/s10712-009-9074-2.
- [32] M. Rapp, I. Strelnikova, B. Strelnikov, P. Hoffmann, M. Friedrich, J. Gumbel, L. Megner, U.-P. Hoppe, S. Robertson, S. Knappmiller, M. Wolff, and D. R. Marsh. Rocket-borne in-situ measurements of meteor smoke: charging properties and implications for seasonal variation. *J. Geophys. Res.*, 2010.
- [16] M. Rapp, I. Strelnikova, B. Strelnikov, M. Friedrich, J. Gumbel, U.-P. Hoppe, T. Blix, O. Havnes, P. Bracikowski, K. A. Lynch, and S. Knappmiller. Microphysical properties of mesospheric aerosols: an overview of results from the ECOMA project. In M. A. Abdu, D. Pacheva, and A. Bhattacharyya, editors, *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series*, volume 2, pages 67–74, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.
- [17] B. Strelnikov and M. Rapp. In situ measurements of small-scale structures in neutrals and charged aerosols. In M. A. Abdu, D. Pacheva, and A. Bhattacharyya, editors, *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series*, volume 2, pages 83–91, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.

In Konferenzberichten etc.:

- [1] I. Strelnikova. *Mesospheric Aerosol Particles: Evidence from Rocket and Radar Techniques*. PhD thesis, Rostock University, 2009.
- [2] I. Strelnikova, M. Rapp, B. Strelnikov, G. Baumgarten, R. Latteck, U.-P. Hoppe, M. Friedrich, and J. Gumbel. In-situ studies of meteor smoke particles in the middle atmosphere during the ECOMA rocket campaigns. In *Proceedings of the 19th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 7-11 June 2009, Bad Reichenhall, Germany (ESA SP-671)*, pages 111–116, 2009.
- [3] B. Strelnikov, M. Rapp, I. Strelnikova, R. Latteck, N. Engler, T. A. Blix, U.-P. Hoppe, and M. Friedrich. Small-scale structures in neutral and plasma species in the middle atmosphere as observed during the ECOMA rocket campaigns. In *Proceedings of the 19th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 7-11 June 2009, Bad Reichenhall, Germany (ESA SP-671)*, pages 105–110, 2009.
- [4] N. Engler, W. Singer, R. Latteck, M. Rapp, and B. Strelnikov. A case study of extrem aspect sensitive vhf radar backscatter in the vicinity of pmse during the ecoma 2008 rocket campaign. In *Proceedings of the 19th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 7-11 June 2009, Bad Reichenhall, Germany (ESA SP-671)*, pages 117–122, 2009.
- [5] M. Friedrich, K. Torkar, M. Rapp, I. Strelnikova, R. Latteck, and T. A. Blix. In-situ observations of a dying sporadic e-layer. In *Proceedings of the 19th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 7-11 June 2009, Bad Reichenhall, Germany (ESA SP-671)*, pages 123–128, 2009.
- [6] H. Asmus. Laboruntersuchungen zu den Eigenschaften eines neuartigen raketengetragenen Detektors zum in-situ Nachweis von Nanopartikeln in der mittleren Atmsphäre. Bachelorarbeit, Universität Rostock, Rostock, Deutschland, 2010.
- [7] U.-P. Hoppe, M. Friedrich, T. A. Blix, J. I. Moen, T. A. Bekkeng, K. R. Svenes, A. Svendsen, M. Rapp, and K. Torkar. The charge balance in the presence of meteoric smoke in the upper

- mesosphere under winter conditions - preliminary results. In *Proceedings of the 20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 22-26 May 2011, Hyeres, France (ESA SP-700)*, 2011. in press.
- [8] M. Friedrich, M. Rapp, T. Blix, U.-P. Hoppe, and K. Torkar. Electron loss and meteoric dust in the mesosphere. In *Proceedings of the 20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 22-26 May 2011, Hyeres, France (ESA SP-700)*, 2011. in press.
- [9] S. M. Ernst, S. Skruszewicz, B. Strelnikov, and M. Rapp. Absolute calibration of vacuum ultraviolet xenon flashlamps used for photoionization of meteor smoke particles. In *Proceedings of the 20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 22-26 May 2011, Hyeres, France (ESA SP-700)*, 2011. in press.
- [10] A. Szewczyk, B. Strelnikov, and M. Rapp. In situ density, temperature, and turbulence measurements in the middle atmosphere during ECOMA 2010. In *Proceedings of the 20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 22-26 May 2011, Hyeres, France (ESA SP-700)*, 2011. in press.
- [11] S. M. Ernst. Kalibrierung von VUV Xenon-Blitzlampen zur Photoionisation und Nachweis meteorischer Staubpartikel. Diplomarbeit, in vorbereitung, TU Freiberg, Freiberg, Deutschland, 2011.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart
3a. Titel des Berichts	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))	5. Abschlußdatum des Vorhabens
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Postfach 300 364 D-53183 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Insitution
	10. Förderkennzeichen *)
	11a. Seitenzahl Bericht
	11b. Seitenzahl Publikation
16. Zusätzliche Angaben	12. Literaturangaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	14. Tabellen
18. Kurzfassung	15. Abbildungen
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des DLR soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report
3a. Report Title	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))	5. End of Project
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
	7. Form of Publication
8. Performing Organization(s) (Name, Address)	9. Originator's Report No.
	10. Reference No.
	11a. No. of Pages Report
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Postfach 300 364 D-53183 Bonn	14. No. of Tables
	15. No. of Figures
	16. Supplementary Notes
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract	
19. Keywords	
20. Publisher	21. Price